

寄棟屋根の設計用風圧係数

(財)日本建築総合試験所 試験研究センター 耐風試験室 室長 博士(工学) 西村宏昭



1. はじめに

建築物や構造物の風荷重がその形状に依存することはよく知られている。そのため、多くの設計基準は建築物や構造物の形状ごとに設計用風圧係数を与えている。建築基準法でも平成12年建設省告示第1454号で構造骨組用風圧係数が、また同告示第1458号で外装材用外圧係数が、切妻屋根、陸屋根、片流れ屋根、鋸歯状屋根、円弧屋根などの屋根形状について示されている。しかし、建築物で比較的多いと思われる寄棟屋根の外圧係数は与えられていない。

建築基準法施行令第87条第2項では、設計しようとする建築物の外圧係数は風洞実験によって決定される場合の他、告示第1454号と第1458号に示された外圧係数を用いてもよいと書かれており、風洞実験によって求められた外圧係数の値の方が告示で例示された外圧係数の値よりも優位に位置付けられている。本稿では、風洞実験で決定された寄棟屋根の設計用外圧係数について述べる。前述の告示で与えられている各種の屋根形状の外圧係数は軒の出がない形状の屋根についての値であるが、この風洞実験では軒の出の変化についても考慮している。その際、軒天井の風圧係数も測定したので、その設計用風圧係数についても述べている。

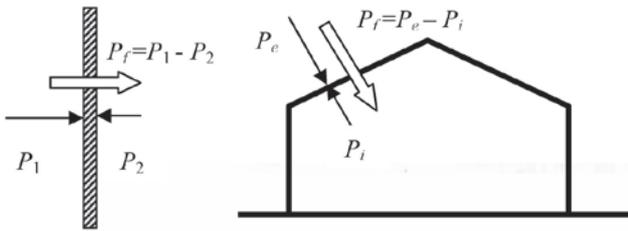
2. 風圧係数の定義

風圧は、面に作用する単位面積当りの風の力(N/m^2)で、注目する面を押す方向が正の符号で表され、面

を引く方向は負の符号で表される。物体に作用する風の力、すなわち風力はその物体に作用する風圧の方向を考慮して足し合わせた合力(ベクトル合成された力)である。板状の物体に作用する風力 P_f は、それぞれの面に作用する圧力の差 $P_f = P_1 - P_2$ で表される(図1(a)参照)。ここで、この風力はまだ単位面積当りの力(N/m^2)であり、板に掛かる風による全体の力(N)は、差圧である風力に板の面積を乗じて求めなければならない。ところが、板全体の力もまた「風力」と呼ぶことがあるので、多くの人々が混乱するようである。告示第1458号では風荷重を風圧力と呼び、単位面積当りの力(N/m^2)で表しているが、建築物荷重指針では注目する部材の面積を乗じた力(N)を風荷重と呼んでいる。これらの用語は厳密に区別して用いられないので、専門家の間でも混乱することがある。この問題は容易に解決せず、常に単位を付けて風荷重を表現しなければならない。

建築物全体の風力は建築物表面全体の圧力の方向を考慮した合力として求められるが、屋根や壁の風力は外面に作用する風圧 P_e と内面に作用する風圧 P_i (すなわち室内圧)との差 $P_f = P_e - P_i$ で与えられる(図1(b)参照)。風圧または風力は、接近流の速度圧 $q (=1/2 \rho V^2)$ 、 ρ は空気密度、 V は接近風速)と風圧係数または風力係数との積でそれぞれ表される。建築基準法では空気密度を $\rho = 1.2 \text{kg/m}^3$ と仮定して、速度圧を $q = 0.6V^2$ と与えている。室内圧係数は建築物の開口部または隙間を通して流入する空気のバランスで決定され、縮小模型を用いる風洞実験では測定が困難であるため、基準では別に定めている。一般に単に風

圧係数というとき外圧係数を指すことが多く、この稿でもそれに倣っている。



(a) 板状の物体の風力係数 (b) 建築物の風力係数
 図1 風力係数と風圧係数の関係

構造骨組用風力係数には告示第1454号の定義により時間平均風力係数が用いられ、外装材用風力係数には告示第1458号の定義によりピーク風力係数が用いられる。いずれも変動する風荷重の瞬間的なピークの値で設計されなければならない、構造骨組用風荷重は平均風力係数にガスト影響係数を乗じることにより、また外装材用風荷重はピークの風力係数を直接与えることによって、いずれもピークの風荷重が計算される。この違いは主に注目する面の大きさによって荷重の特性が異なることの考慮から生じている。一般に、単位面積当りの荷重は外装材用風荷重の方が構造

骨組用風荷重よりも大きい。(全体の力で比較すると、構造骨組用荷重の面積の方が外装材用風荷重の面積よりも大きいので、当然ながら構造骨組用荷重の方が大きい。)構造骨組用風荷重と外装材用風荷重の算定法の区別は一見煩雑であるが、合理的な荷重を算定するために必要であって、わが国だけでなく海外の基準でも一般に採用されている。

3. 風洞実験の方法

風洞は当試験所所有のエッフェル型吹き出し式風洞を用いた。この風洞の大きさは全長約19m、測定筒の長さ約12mで、測定部の断面は幅1.8m×高さ1.4mである(図2参照)。模型は直径1.6mのターンテーブルの中心に置かれ、その風上側に置かれたバリアとラフネス・ブロックを通して、自然風に近い乱れた風を作ることができる。ラフネス・ブロックの大きさを変化させることにより、海沿いから市街地までの風に似た状態を風洞の床上に作る事が可能である。この実験では、一般の市街地に相当する気流、つまり平成12年建設省告示第1454号に規定される粗度区分IIIの気流(平均風速のべき指数約0.2)を再現した(図3参照)。

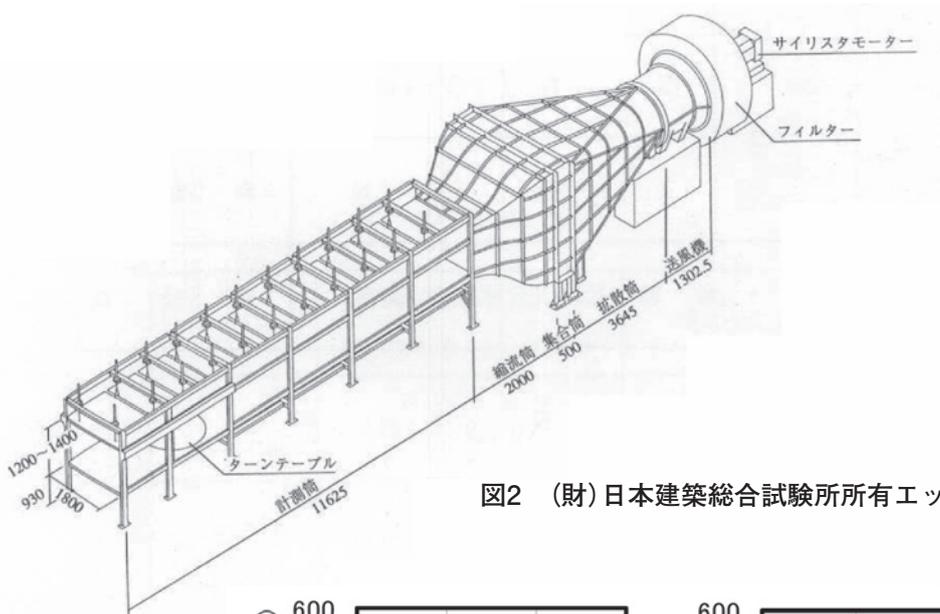


図2 (財)日本建築総合試験所所有エッフェル型吹き出し式風洞

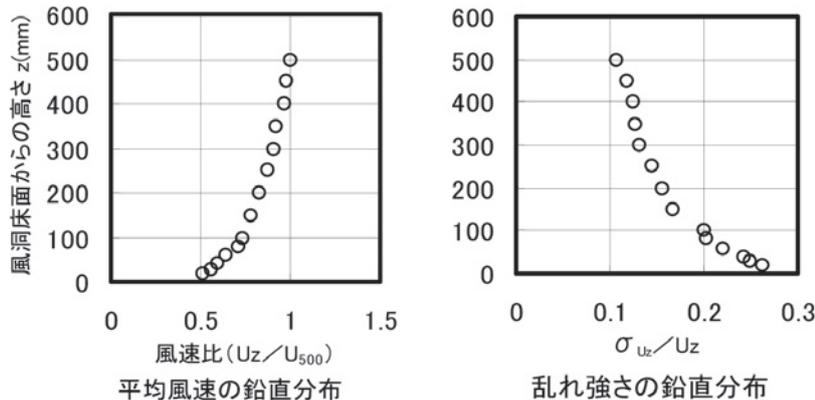


図3 実験気流(粗度区分Ⅲ相当)

実験模型は幅 $B=30\text{cm}$ ×奥行き $D=30\text{cm}$ の正方形平面の寄棟屋根をもつ、アクリル樹脂で作られた低層建築物の模型とした。これらの模型は、軒高さを一定($h=12\text{cm}$)とし、4つの勾配($\beta=10, 20, 30$ および 40°)の屋根が準備された。

告示第1454号には建築物の構造骨組用風力係数が、また告示第1458号には外装材用風力係数が示され、切妻屋根や片流れ屋根などの例が記載されているが、これらの屋根は軒の出がない形状の建築物である。軒の出がある建築物は一般に多くあるので、この実験では壁面の位置を軒から内側に移動させて軒の出を再現した。軒の出 b ($=0, 2, 4\text{cm}$)は屋根の幅 B で無次元化して表し、 $b/B=0, 1/15$ および $2/15$ とした。

屋根に作用する風圧を、模型の表面に開けた直径 1mm の穴からビニールチューブで風洞の床下に設置した圧力変換器に導き、コンピュータで全点同時に測定した。圧力測定点は屋根上面の284箇所と軒天井面($b/B=1/15$ では32点、 $b/B=2/15$ では24点)に設けた。実験模型を図4、写真1および写真2に示す。風圧は、一般に、大きく変動するため、 400Hz の周波数でサンプリングし、それらの平均値やピーク値などの統計量を計算した。前述のように、風荷重は設計で注目する部材の大きさによって変化するが、ここでは約 1m^2 の大きさの外装材用外圧係数について述べる。データ処

理の方法についての詳細は文献1)を参照されたい。

4. 実験結果

4.1 屋根勾配による風圧係数の特徴

軒の出のない正方形平面の寄棟屋根の壁に垂直な風向での屋根中心線上の風圧分布を図5に示す。正の風圧係数は注目する面の内方向(屋根の下方向)に、負の風圧係数は面の外方向(屋根の上方向)に図示している。図には最大ピーク風圧係数、平均風圧係数および最小ピーク風圧係数を示した。風圧は時間的に変動するので、その変動の中での最大値と最小値がピーク風圧係数として表現されている。つまり、ある点での風圧は最大ピーク風圧係数と最小ピーク風圧係数の範囲で変動し、時間平均的には平均風圧係数をもつ。一般に、風圧係数は正と負の符号をもち、正は注目する面を外側から押し付ける方向に作用する圧力を表し、負は外側に向かって吸われる方向に作用する圧力を指す。ここで、最小風圧係数はその絶対量の大きさが小さいことを言うのではなく、数直線をイメージして、負の方向の極値をいう。したがって、最小ピーク風圧係数は弱い正の風圧係数であることもあるし、強い負の風圧係数であることもある。

屋根勾配 $\beta=10^\circ$ では、屋根風上端部で風上壁面か

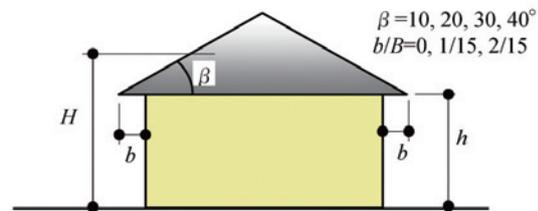
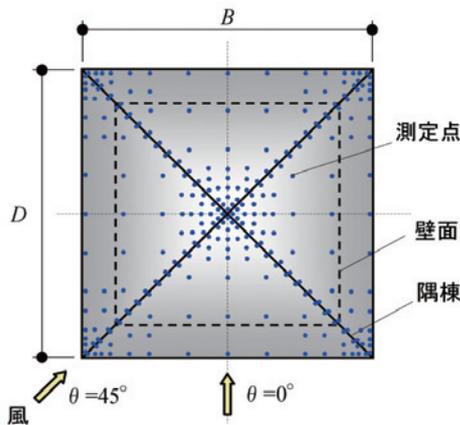


図4 実験模型

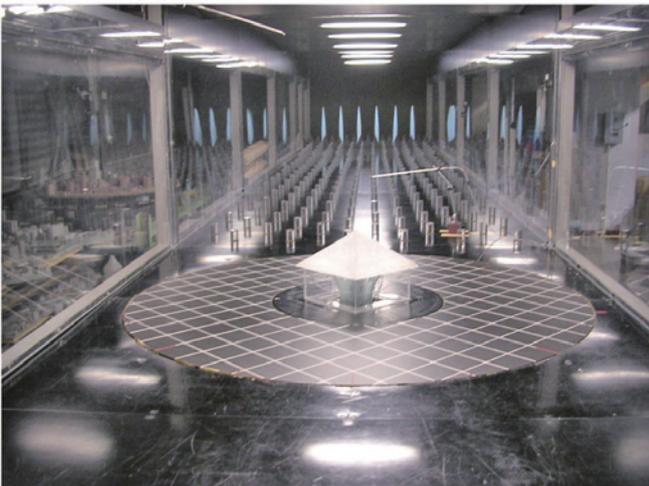


写真1 風洞内に設置された模型

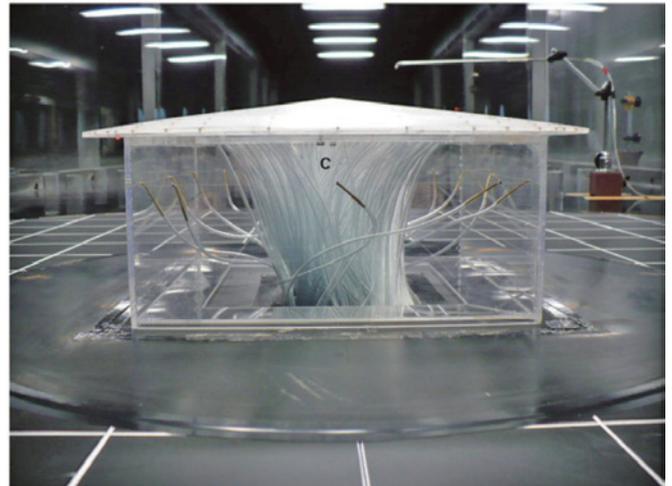


写真2 寄棟屋根をもつ建築物模型

らの剥離の影響による強い負圧が見られる。一般に、緩勾配の屋根では、この風圧分布のように軒先に強い負圧が作用する。流れの剥離は空気力学の興味深い現象の一つで、物体の表面に沿って流れる流体が鋭い角で急激に曲がることができず、物体の表面から外側に飛び出す現象を言う。飛び出した流れはその外側の流れ方向の流体によって流れ方向に強制的に向きを変化させられる。このときの流体のストレスが剥離直後の物体の表面に強い負圧を作用させる。多くの基準(例えば告示第1458号)で、建築物の屋根や壁の端部で強い負圧による風荷重を設定しているのは剥離による影響を考慮したものである。

屋根勾配 β が大きくなると風上面で風圧係数は正側に変化し、 $\beta=40^\circ$ では風上側屋根面の広い部分で平均風圧係数が正の値を示す。このことは、屋根勾配が大きくなるにつれ、軒先で剥離した流れが風上屋根面で再付着することを示している。再付着は風上側の軒先で剥離した流れが剥離後の物体表面に再び当たる現象(流体が最初に物体に当るのは風上側の面で、この場合流体は風上側の壁面に付着している)で、再付着する瞬間にその点では流体がその物体表面を外側から内側に向かって押すので正の圧力が発生する。連続して再付着する場合には常に正圧が生じるので、時間平均的にも正圧が作用する。 $\beta=20^\circ$ では、棟頂

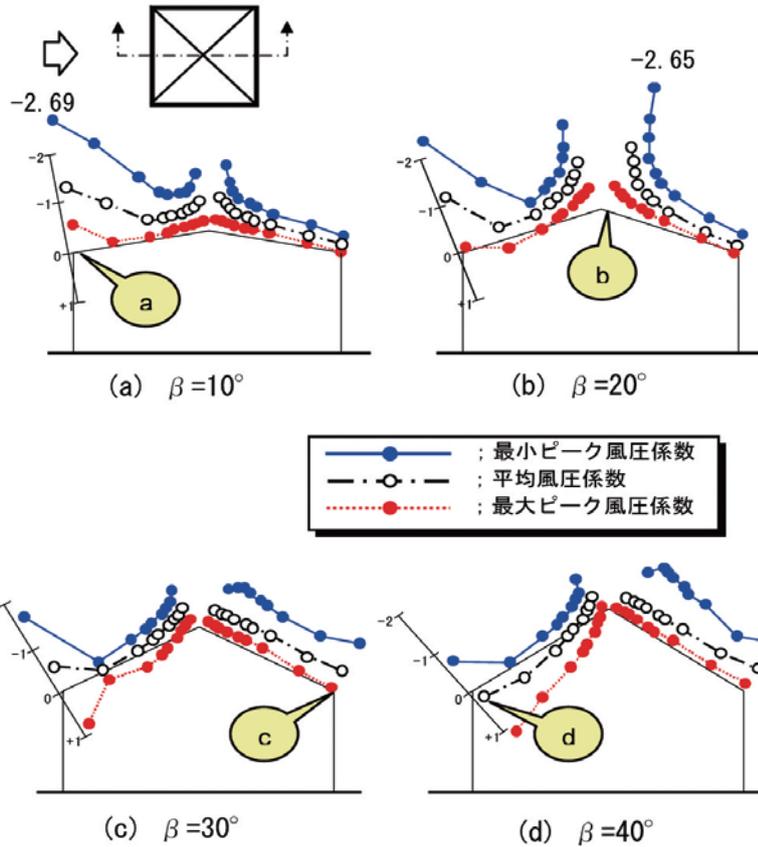


図5 寄棟屋根中心線上の風圧係数分布 ($b/B=0, \theta=0^\circ$)

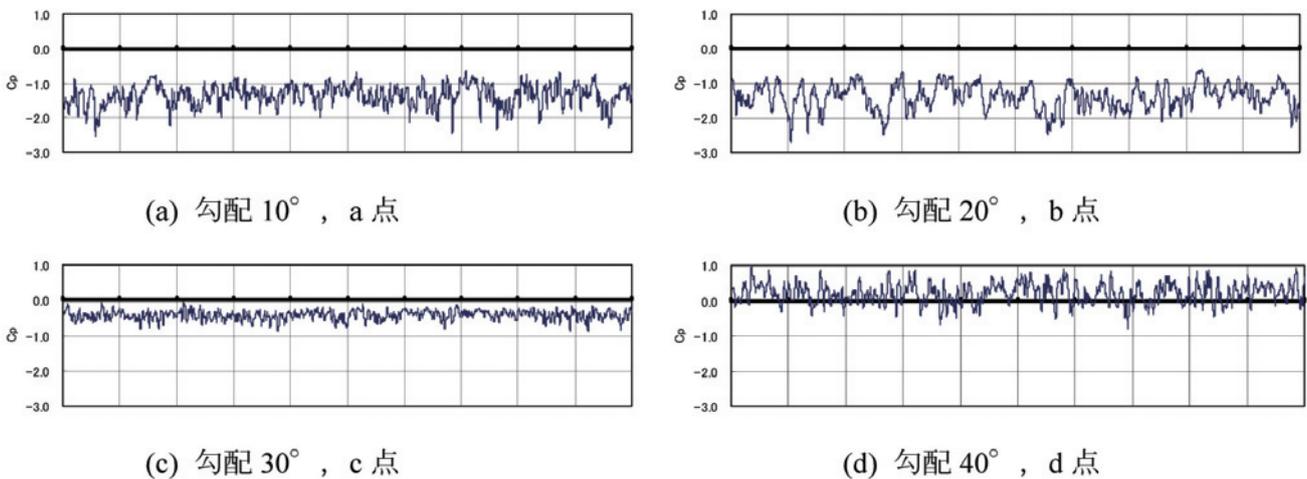


図6 代表的な風圧変動の波形(正方形平面、点の位置は図5を参照のこと)

部付近での風圧係数が負側に大きいことが特徴的で、棟の直ぐ風下側では $\bar{C}_p = -2.65$ を示している。風上側軒先で剥離した流れの外側は速度が大きく、内側は速度が小さいので、その間の流体には強い剪断応力が働いている。この層は剥離剪断層と呼ばれ、剥離剪断層に内側から物体(この場合屋根の棟)が近づくと流体は収束され、物体には強い負圧が作用する。この収束効果は翼断面では顕著に見られ、それらは剥離を伴わずに収束効果のみが現れる特殊なケースであると考えられる。物体がさらに剥離剪断層に近づくと上述のように再付着が生じるが、勾配 20° の屋根は再付着寸前の最も収束効果が強く現れる形状であると考えられ、切妻屋根でもこの勾配の屋根棟部に強い負圧が生じる(告示第1458号では、勾配 20° の切妻屋根の軒端部で -5.4 という値の建築物周りで最大の負圧が設定されている)。

屋根勾配が $\beta = 30^\circ$ 以上になると、風上側屋根面では流れの再付着により軒に近い屋根面と棟に近い屋根面の両方で、 $\beta = 20^\circ$ 以下の屋根に比べて負圧は小さくなるが、再付着した流れは棟で2度目の剥離を生じ、これより風下側の屋根面上に2度目の再付着は生じないので、風下側屋根面全体にわたって比較的強い一様な負圧が作用する。この風下側屋根面の負圧の大きさは風下側壁面の負圧とほぼ等しくなる。

図6は代表的な風圧変動の波形を示したものである。軒先付近(a)および棟付近(b) (図5参照)の風圧変動は非常に激しく、ときおり鋭いスパイク状の負圧が発生していることがわかる。最小ピーク風圧係数 \bar{C}_p はこのスパイク状の負圧の極値を数点の平均値

(時間平均値として求めた平均風圧係数と異なる点に注意すること)として与えた値である。平均風圧係数とこれらの負の極値のピーク風圧係数の比は場所ごとに異なることが、外装材用風圧係数として負のピーク風圧係数を直接与えた一つの理由である。なお、風下側の屋根面(c)では変動の小さい負圧が作用すること、剥離直後の再付着点(d)付近では正圧が作用し、瞬間的に負圧が作用する様子が波形から分かる。

屋根全体の平均風圧係数分布の例を図7に示す。上で述べたような屋根中心線上の流れの剥離、再付着および再剥離が屋根上の各部で生じ、複雑な分布を示している。寄棟屋根の形状からくる風圧分布の特徴は隅棟付近で見られ、比較的強い負圧(濃い色の部分)が隅棟の風下側で見ることができる。最小ピーク風圧係数分布の例を図8に示す。緩勾配の屋根の軒先部で $\bar{C}_p = -7.5$ という非常に強い負圧が局部的に生じている。このような強い負圧は軒先での流れの剥離と隅棟による収束効果が同時に発生していることによると考えられる。ただし、この負圧はごく狭い範囲の面でしか生じない。寄棟屋根のコーナー部では強度に十分な余裕のある外装材の固定に配慮する必要がある。

4.2 軒の出の影響

海外の基準では軒部の設計用風力係数が与えられているものがあるが、建築基準法では、軒の出の効果は示されていない。実験結果から得られた全風向中のピーク風圧係数の最小値(ここでは負最大ピーク風圧係数と呼ぶ)と屋根勾配および軒の出の関係を図9に示す。軒の出がない模型($b/B=0$)は多くの基標準の基になった実験で採用されているケースである。軒の出がないケースでは、コーナー部のピーク風圧係数 \bar{C}_p は屋根勾配 $\beta = 10^\circ$ で -7 を超え、屋根勾配 β の増加に従って減少する(図9(a)参照)。図5から暗示されるように、 $\beta = 10^\circ$ では屋根面上で流れの再付着が生じないため、風上側軒先の剥離点の直ぐ風下側では強い負圧が生じ、コーナー部の隅棟風上側では非常に強い負圧が生じる。このコーナー部の強い負圧はごく限られた領域にのみ生じるのは前述のとおりである。軒の出がある場合、 $\beta = 10^\circ$ と 20° ではコーナー部の局部風圧を減少させるのに対し、 $\beta = 30^\circ$ と 40° では逆に軒の出がコーナー部の局部風圧を増大させる興味深い現象が見られた。これは、図10に示すようにコーナー部を斜めに横切る気流が屋根上で曲率を増す翼周りの気流のような効果をもたらしたと推測される。図9(b)に示す隅棟部の強い負圧は $\beta = 20^\circ$ で最も大きくなり、 $\bar{C}_p = -3.5$ を超える。屋根勾配 $\beta = 20^\circ$ で棟近傍の局部風圧が強くなる現象は切妻屋根でも見られ、この勾配付近で屋根頂部の棟は風上側軒先からの剥離流との強い干渉を生じると考えられる。隅棟部近傍の局部風圧は軒の出による影響をあまり強く受けない。

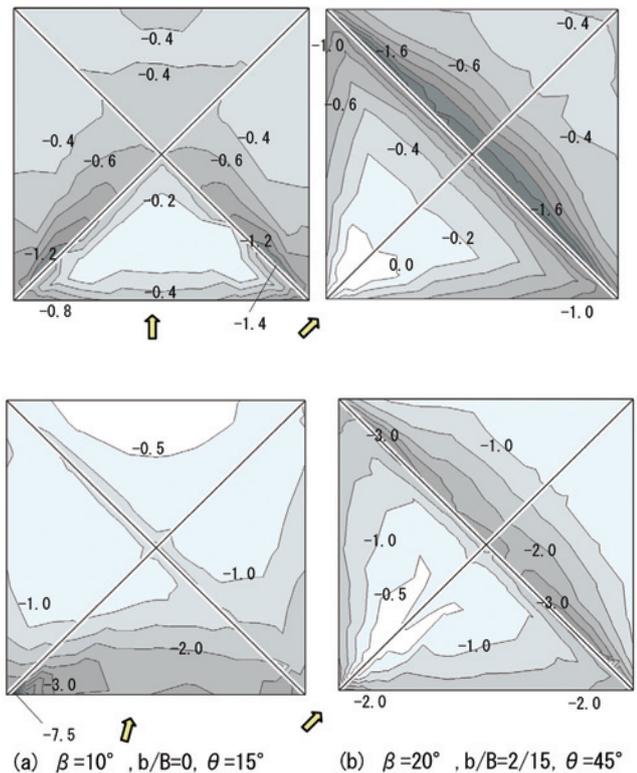


図8 最小ピーク風圧係数分布の例

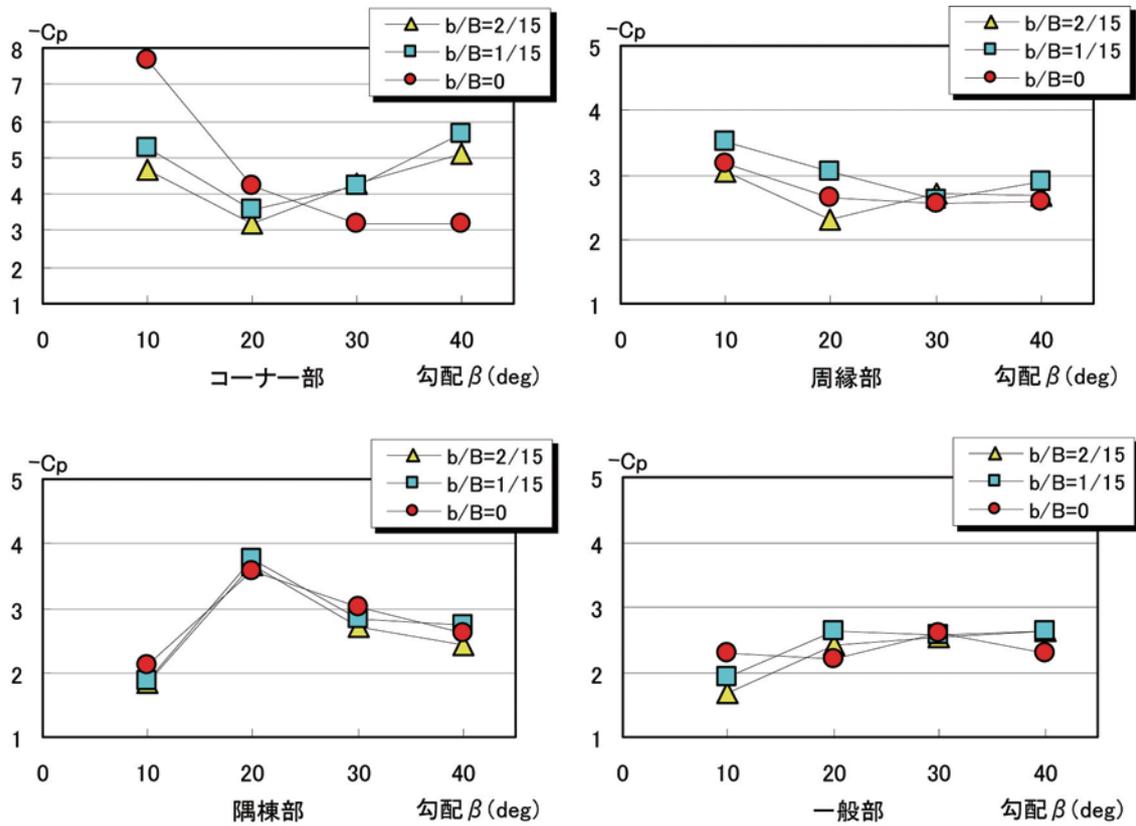


図9 寄棟屋根の負最大ピーク風圧係数

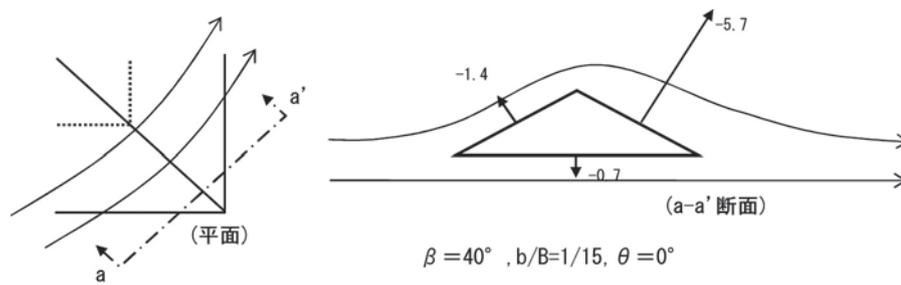


図10 コーナー部断面の最小ピーク風圧係数の分布
(流跡線は推測)

設計上の観点から、緩勾配の屋根では軒の出を設けると局所的な風荷重を小さく設定でき、急勾配の屋根では軒の出がない方が風荷重を比較的小さくできることを知っておくことは有益であろう。

4.3 寄棟屋根の外装材用設計ピーク風圧係数

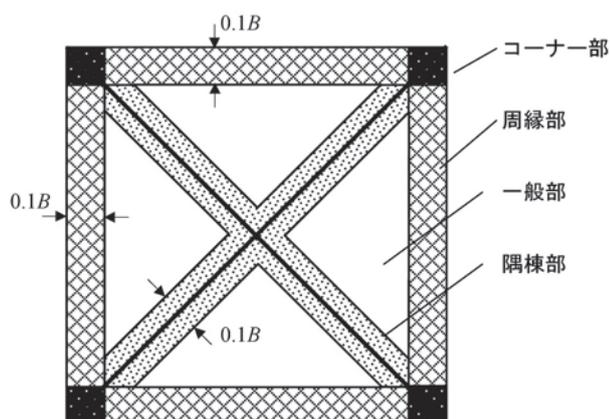
風洞実験結果から、特定の建築物でなく、一般の建築外装材設計用ピーク風圧係数を決定することは、実際のところ非常に難しい。それは、考慮する外装材の面積とその応答特性によって作用する瞬間風圧の大きさが変化するからである。つまり、小さい面積の外装材は、短い周期の圧力変動まで応答するので、鋭いピークの風圧まで考慮しなければならないが、大きい面積の外装材は、短い周期の圧力変動には応答しないので、考慮する圧力変動は比較的小さいピークの風圧変動を考慮すれば良い。したがって、設計しようとする外装材の大きさによって設計風圧係数は変化するが、建築基準法などの基準ではあまり複雑な荷重設定はできないので、実験結果を基にして実質上の問題が生じない荷重を設定する作業が必要であり、それには広い議論が望まれる。

ここでは、比較的大規模の建築物を想定し、金属製屋根葺き材で屋根が覆われる場合を考える。モデルの縮尺を1/100とすると実建物の平面1辺は30mで、外装材の負担面積は約1m²、ピークの風圧係数は0.5～1秒間程度の平均化時間を想定していることになる。本実験では、建築基準法にある切妻屋根の風圧係数と比較すると非常に高い圧力が測定されているが、それは

表1 寄棟屋根の外装材設計用負のピーク外圧係数

部位 \ 勾配	10° 以下	20°	30° 以上
一般部	-2.5	-2.5	-2.5
周縁部	-3.2	-2.6	-2.6
隅棟部	-2.1	-3.6	-3.0
コーナー部	-7.5 (-5.2)	-4.2 (-3.6)	-3.2 (-5.7)

備考：1/15B程度の軒の出がある場合、コーナー部のピーク外圧係数は()内の値を用いることができる。



建築基準法の規定値が比較的小規模の建築物を想定しているためである。

寄棟屋根の外装材用ピーク風圧係数は建築基準法で例示されていないので、施行令第87条の2に従って、風洞実験でその風圧係数を設定することができる。ここでは、実験結果に基づいて外装材用ピーク風圧係数を表1のように提案する。ただし、建築基準法に寄棟屋根の風力係数が将来例示されるときには、他の実験結果とも併せてそれらの値が決定されることになるはずなので、ここでの提案値がそのまま採用されないこともあることは承知頂きたい。表1には屋根勾配40°の実験結果を勾配30°以上にまとめて示した。それぞれの領域の幅は屋根平面の幅Bを基準として0.1Bとした。なお、長方形平面の寄棟屋根では長辺に平行な棟があるが、その部分については隅棟部の値を用いることができよう。

4.4 軒天井の風圧係数

軒天井は外気に面しているので風荷重を受けるがその風圧係数はこれまで明らかにされていなかった。風上側に位置する軒天井では正の風圧が軒天井を下

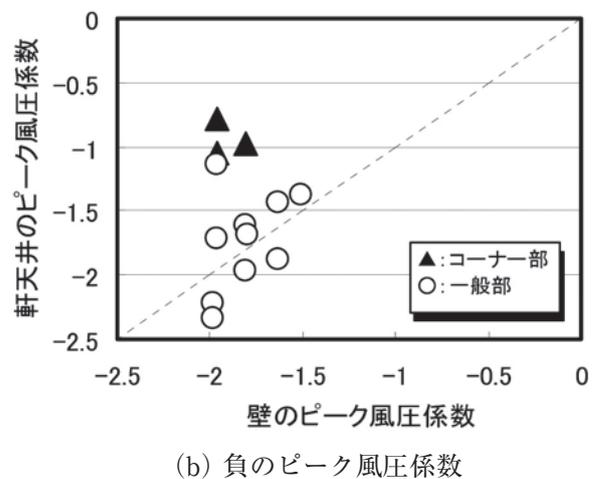
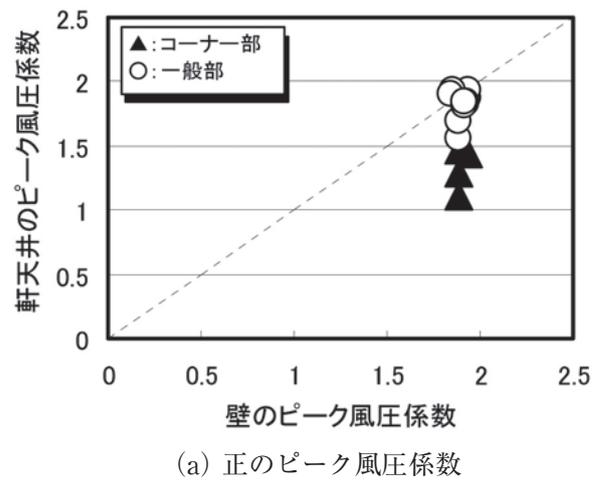


図11 軒天井と壁のピーク風圧係数

から上に押し上げる方向に作用し、風下側と側方に位置する軒天井では負の風圧が軒天井を下に引き下げる方向に作用する。このように、軒天井は正と負の両方の荷重で設計されなければならない。一般に軒天井は軽量で、これまで設計上の注意があまり払われていなかった部位であるが、軒天井が破損すると小屋裏の圧力が外壁面の圧力とほぼ等しくなり、風圧で直接破損した箇所以外の軒天井も連鎖的に破損する危険性がある。また、小屋裏空間は室内天井の上側にあり、一般に室内の天井は風圧に対して設計されないため、室内の天井が小屋裏の圧力の増加によって脱落する被害に発展することもある。

本実験で測定した軒天井と直下の壁の正と負のピーク風圧係数の比較を図11に示す。軒天井の正のピーク風圧係数は壁のピーク風圧係数を上回ることはないが、軒天井の負のピーク風圧係数は壁のピーク風圧係数よりも大きくなる箇所があることが分かる。軒天井の負のピーク風圧係数が壁の負のピーク風圧係数を上回るのはコーナー部ではなく一般部である。軒天井のコーナー部と一般部で区別せずに設計用ピーク風圧係数を設定すると正：1.9と負：-2.3である。

5. まとめ

寄棟屋根は比較的多い屋根形状であるが、建築基準法で外圧係数が与えられていないので設計に支障をきたしていた。そこで、寄棟屋根についての風洞実験を実施し、設計用外圧係数を提案した。

実験結果から、寄棟屋根に作用する風圧係数は 20° 以下の緩勾配の屋根と 30° 以上の比較的急勾配の屋根で特徴が異なることが分かった。緩勾配の屋根で

は軒部に近い屋根面で軒先からの流れの剥離の影響によって、また棟と隅棟部では剥離流の収束効果によって負圧が強くなることが分かった。軒先からの流れの剥離の影響は屋根のコーナー部において著しく、屋根勾配 10° ではごく局所的に-7を超える強いピーク風圧係数が見られた。棟部の収束による影響は隅棟部の風下側で見られ、勾配 20° のときに局所的に強くなる。軒の出の影響は屋根のコーナー部にのみ現れ、勾配 10° の屋根のコーナー部で生じる局部負圧を効果的に下げるが、 30° 以上の勾配の屋根コーナー部で強い負圧が発生することがある。外装材が金属板である場合、これらの金属板端部の固定を堅固にする必要がある。軒天井は正と負の両方の荷重が作用し、その大きさは直下の壁に作用する荷重とほぼ等しい。

風洞実験結果に基づいて、寄棟屋根の外装材設計用負ピーク外圧係数を提案した。提案値は比較的大規模の建築物を想定している。この提案値は正方形平面の寄棟屋根をもつ建築物の風洞実験結果をまとめたものである。これらを基準に組み込む際には、長方形平面の寄棟についても考慮されたより一般的な形式で再提案されるはずであるので、ここで示した提案値が若干変化することもあり得るであろう。しかし、大きな変化はないと考えられるので、当面の間、これらの値を用いて風荷重に対して安全な寄棟屋根を設計していただきたい。

参考文献

高森浩治、西村宏昭、浅見理英、染川大輔、相原知子：低層建築物の寄棟屋根に作用する風圧性状 - 正方形平面の場合 -、第20回風工学シンポジウム論文集、pp.409-414, 2008.